

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ ПОДОБНЫЕ ИНДИКАТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗРАЗМЕРНАЯ ДИАГРАММА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ

К.Т.Н. Кальницкий Ф.Е., Морозов Д.Л., Татаров М.Г., К.Т.Н. Федулов А.И.
Московский политехнический университет
kostukov123@yandex.ru

В настоящее время для анализа термодинамических процессов, протекающих в тепловом двигателе, и его эффективности используются индикаторные диаграммы, построенные в размерных значениях параметров рабочего тела – объем, энтропия, давление, температура и других параметров. К числу исключений можно отнести, например, опытные исследования и термодинамические расчеты, выполняемые при проектировании сопла Лаваля реактивных двигателей. Эти исследования основаны на Теории подобия. В предлагаемой читателю работе выполнен графоаналитический расчет эффективности идеализированного цикла теплового двигателя в безразмерных параметрах рабочего тела. Методы научных исследований с использованием безразмерных параметров – критериев подобия являются характерной особенностью Теории подобия. Кроме безразмерной индикаторной диаграммы, разработана и описана энергетическая безразмерная диаграмма кругового замкнутого цикла теплового двигателя. На энергетической диаграмме изображены термодинамические процессы обмена теплотой и механической работой между рабочим телом и окружающей средой в безразмерных координатах теплоты и механической работы. В работе показано, что использование энергетической безразмерной диаграммы наиболее простой и наглядный графоаналитический способ определения эффективности теплового двигателя. Применительно к анализу работы теплового двигателя значимость использования Теории подобия определяется тем, что единственное аналитическое, графическое или опытное исследование теплового конкретного двигателя с наименьшими затруднениями можно распространить на исследование бесконечного множества термодинамически подобных двигателей. Для примера в предлагаемой работе выполнен в безразмерном виде расчет идеализированного цикла двигателя Отто.

Ключевые слова: двигатель тепловой, идеализированный термодинамический цикл теплового двигателя, индикаторная диаграмма, Теория подобия, энергетическая диаграмма термодинамического цикла, эффективность теплового двигателя (КПД), степень сжатия, механическая работа, термодинамический процесс, термодинамически подобные двигатели.

Введение

Под термодинамически подобными тепловыми двигателями следует понимать двигатели, в которых реализуются тождественно одинаковые термодинамические процессы. Более того, все термодинамические процессы, составляющие цикл двигателя, должны быть реализованы в той же последовательности, в которой реализуется цикл двигателя в размерных параметрах состояния рабочего тела. Эта последовательность сформулирована Карно.

Математическая запись тождественных термодинамических процессов должна состоять только лишь из безразмерных, тождественно равных по величине безразмерных термодинамических комплексов сравниваемых двига-

телей. Эти комплексы формируются из размерных параметров состояния рабочего тела, его физических свойств и из размерных геометрических характеристик изучаемых двигателей. Например, при исследовании идеализированного цикла двигателя Отто используются не полный объем рабочего тела и объем камеры горения, а отношение этих объемов. Это отношение называют степенью сжатия ε . Аналогичное замечание следует сделать и по отношению безразмерного показателя адиабаты k , характеризующего физические свойства рабочего тела.

Преимущество такого подхода очевидно. Действительно, эффективность идеализированного двигателя, работающего по циклу Отто, зависит только лишь от безразмерных

критериев подобия ε и k [3]

$$\eta = 1 - 1/\varepsilon^{(k-1)}. \quad (1)$$

В этом уравнении (1): η – коэффициент полезного действия двигателя, представляющий собой отношение механической работы двигателя к подведенной к рабочему телу теплоте. Подчеркнем, что коэффициент полезного действия теплового двигателя не имеет размерности и также является критерием подобия теплового двигателя.

Теперь становится очевидным преимущество использования Теории подобия в анализе самых разнообразных научных задач. Полученное решение эффективности идеализированных двигателей Отто, имеющих тождественно равные значения степени сжатия рабочего тела и показателя адиабаты k , справедливо для бесконечно большого числа термодинамически подобных двигателей. Эти двигатели могут отличаться друг от друга разными диаметрами своих цилиндров, разным ходом поршней, разными параметрами состояния рабочего тела, и, наконец, сравниваемые двигатели могут отличаться друг от друга разной мощностью и разным расходом топлива.

В предлагаемой работе приведена индикаторная диаграмма идеализированного теплового двигателя Отто, построенная в соответствии с принципами Теории подобия, выполнено сравнение точности графоаналитического решения с аналитическим решением.

Кроме этого, разработана и апробирована безразмерная энергетическая диаграмма теплового двигателя, показаны ее преимущества.

С целью обобщения выполненных расчетов параметры рабочего тела на входе в двигатель удовлетворяют требованиям [4].

Значения выбранных параметров: полное атмосферное давление 100 кПа; температура окружающей среды 298 К (25 °С).

Примечание. Тождественно равные значения давления и температуры рабочего тела на входе в сравниваемые двигатели определяют возможность сравнения прочностных характеристик сравниваемых двигателей.

Методы и средства проведения исследований

Основные допущения

Принятые в предлагаемой работе допущения полностью идентичны используемым в Термодинамике [5]:

1) термодинамические процессы, протекающие в рассматриваемых тепловых двигателях, равновесны;

2) все термодинамические процессы обратимы;

3) во всех термодинамических процессах участвует рабочее тело с тождественно одинаковыми физическими свойствами.

Эти допущения предопределены большой сложностью математического описания реальных термодинамических процессов, протекающих при наличии, например, вязкого трения в рабочем теле.

Таким образом, в предлагаемой работе рассматриваются термодинамические циклы только лишь идеализированного теплового двигателя.

Результаты исследований и их обсуждение

Безразмерная термодинамическая модель идеализированного двигателя Отто и его индикаторная безразмерная диаграмма

В этом разделе работы показаны преимущества Теории подобия применительно к анализу термодинамических циклов, протекающих в тепловых двигателях. Предлагаемый анализ выполнен на примере идеализированного двигателя Отто.

Идеализированный цикл Отто состоит из двух адиабатических термодинамических процессов обмена рабочим телом с окружающей средой механической работой и двух изохорных процессов, в одном из которых подводится к рабочему телу теплота, а во втором – теплота отводится.

Обычно индикаторная диаграмма идеализированного цикла двигателя Отто строится в размерных координатах объем – давление рабочего тела. Исключение составляет безразмерный показатель адиабаты k , и в соответствии с правилами Теории подобия показатель адиабаты является критерием подобия. Тем не менее, подчеркнем, что показатель адиабаты представляет собой одну из физических характеристик рабочего тела, и потому его можно рассматривать как критерий подобия только лишь для рабочих тел с одинаковыми физическими свойствами.

Необходимые для дальнейших расчетов уравнения термодинамических процессов в размерных параметрах рабочего тела приведены в [5, 6] и в таблице 1.

Термодинамические процессы, образующие идеализированный термодинамический цикл Отто в размерных и в безразмерных параметрах рабочего тела [5, 6]

Адиабатное сжатие		Термодинамический процесс			
		Изохорный подвод теплоты	Адиабатное расширение	Изохорный отвод теплоты	
Параметры рабочего тела	Размерные	$P \cdot V^k = \text{const}$ $T \cdot V^{k-1} = \text{const}$	$V = \text{const}$ $P = \text{const} \cdot T$	$P \cdot V^k = \text{const}$ $T \cdot V^{k-1} = \text{const}$	$V = \text{const}$ $P = \text{const} \cdot T$
	Безразмерные	$P_{br} = \left(\frac{P}{(100000)} \right) / \varepsilon^k$ $T_{br} = \frac{T}{298} \cdot \varepsilon^{k-1}$	$\varepsilon = \text{const}$ $\frac{T_{br}}{P_{br}} = \text{const}$	$P_{br} = \left(\frac{P}{(100000)} \right) / \varepsilon^k$ $T_{br} = \frac{T}{298} \cdot \varepsilon^{k-1}$	$\varepsilon = \text{const}$ $\frac{T_{br}}{P_{br}} = \text{const}$

Примечания.

1. Параметры давления и температуры, имеющие индекс «br» – P_{br} и T_{br} , – это безразмерные параметры давления и температуры рабочего тела.

2. Безразмерное значение давления рабочего тела в конце изохорного процесса подвода теплоты и степень сжатия рабочего тела в цикле заданы произвольно.

3. Адиабатное сжатие – термодинамический процесс уменьшения объема рабочего тела при отсутствии обмена теплотой между окружающей средой и рабочим телом.

4. Адиабатное расширение – термодинамический процесс увеличения объема рабочего тела при отсутствии обмена теплотой между окружающей средой и рабочим телом.

5. Изохорный подвод теплоты – процесс подвода теплоты окислением топливоздушнoй смеси при неизменном объеме рабочего тела.

6. Изохорный отвод теплоты – процесс отвода теплоты от рабочего тела при его истечении из двигателя в окружающую среду.

7. P – значения давления рабочего тела в характерных точках цикла (начало и конец термодинамического процесса).

8. V – значения объема рабочего тела в характерных точках цикла.

9. T – значения абсолютных температур рабочего тела в характерных точках идеализированного термодинамического цикла двигателя Отто.

В этой же таблице приведены и уравнения термодинамических процессов в безразмерных параметрах (критериях подобия). Эти уравнения использованы для построения безразмерной индикаторной диаграммы идеализированного двигателя Отто (рис. 1).

С целью построения безразмерной индикаторной диаграммы идеализированного цикла двигателя Отто примем, что объем камеры горения двигателя равен одной условной единице объема, а полный объем цилиндра двигателя равен 15 условным единицам объема. Подчеркнем: условная единица объема может иметь произвольную величину. Тогда степень сжатия рабочего тела в цикле $\varepsilon = 15$ [3].

Аналогично поступим и с давлением рабочего тела – примем, что при положении поршня в нижней мертвой точке, давление рабочего тела равно одной условной единице

давления, а в конце процесса окисления топливоздушнoй смеси давление рабочего тела равно 71 условным единицам.

Рис. 1 построен в электронном ресурсе [7]. Все построения выполнены на основе приведенных в этой работе уравнений. Значения указанных на диаграмме безразмерных давлений рабочего тела в термодинамическом цикле получены в процессе построения индикаторной диаграммы.

Подробный анализ работы идеализированного двигателя Отто приведен в многочисленной литературе. Например, в этой работе приведена ссылка на определение коэффициента полезного действия такого теплового двигателя [3].

Выполним расчет коэффициента полезного действия идеализированного цикла двигателя Отто, используя безразмерную индикаторную

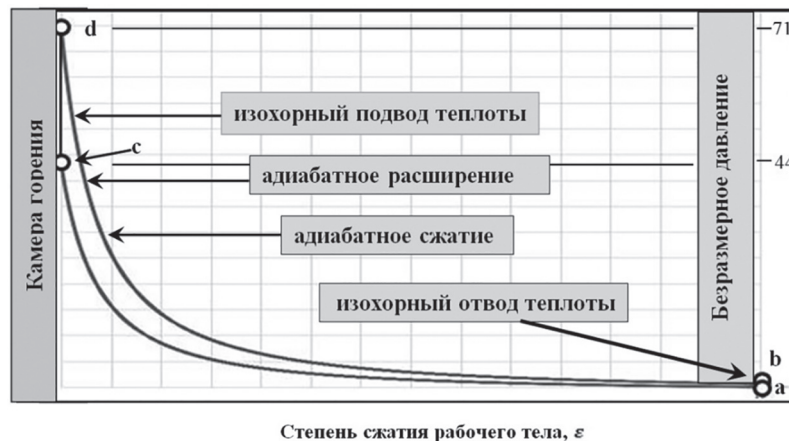


Рис. 1. Безразмерная индикаторная диаграмма идеализированного теплового двигателя Отто

диаграмму. Такой контроль желателен в связи с тем, что безразмерная диаграмма теплового двигателя описывает бесконечно большое количество термодинамически подобных идеализированных двигателей Отто.

$$\eta = \frac{W}{Q_p} = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = 1 - \frac{Q_o}{Q_p} = 1 - \frac{c_v \cdot (T_b - T_a)}{c_v \cdot (T_d - T_c)} = 1 - \frac{(T_b - T_a)}{(T_d - T_c)} \quad (2)$$

В этой зависимости: W – механическая работа рабочего тела, произведенная за цикл; Q_p – теплота, подведенная к рабочему телу двигателя в изохорном процессе «cd» за один цикл; Q_o – теплота, отведенная от рабочего тела двигателя в изохорном процессе «ba» за цикл; c_v – удельная теплоемкость рабочего тела при постоянном объеме; T_d и T_b – абсолютные температуры точек «d» и «b» соответственно, принадлежащих адиабате расширения рабочего тела «db»; T_a и T_c – абсолютные температуры точек «a» и «c» соответственно, принадлежащих адиабате сжатия рабочего тела ac.

Используя уравнение адиабатного термодинамического процесса,

$$T \cdot V^{k-1} = \text{const},$$

получим:

$$T_a = \frac{T_c}{\epsilon^{(k-1)}} \text{ и } T_b = \frac{T_d}{\epsilon^{(k-1)}}.$$

Подставим эти уравнения в уравнение 2:

$$\eta = 1 - \frac{(T_b - T_a)}{(T_d - T_c)} = 1 - \frac{\frac{T_d}{\epsilon^{k-1}} - \frac{T_c}{\epsilon^{k-1}}}{(T_d - T_c)} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}.$$

Полученное графоаналитическое решение для коэффициента полезного действия идеализированного двигателя Отто совпадает с аналитическим решением [1].

В заключение этого раздела следует акцентировать внимание и еще на одном важном наблюдении. Из графоаналитического и аналитического решений для эффективности полезного действия идеализированного цикла Отто следует, что коэффициент полезного действия тем больше, чем больше степень сжатия рабочего тела в цикле. Этот важный известный факт требует термодинамического объяснения.

Рассматривая рис. 1, можно констатировать, что с увеличением степени сжатия рабочего тела в термодинамическом цикле увеличивается и степень адиабатного расширения рабочего тела. Внутренняя энергия рабочего тела при этом уменьшается, и рабочее тело, истекая из цилиндра двигателя в окружающую среду, уносит все меньшую теплоту.

Напомним, сравнение эффективности циклов тепловых двигателей в Термодинамике принято выполнять при тождественно равных наибольших значениях температур и давлений рабочего тела. Учитывая это требование, можно констатировать – по мере увеличения степени сжатия рабочего тела в термодинамическом цикле теплового двигателя отвод теплоты в окружающую среду становится все меньшим, а его эффективность увеличивается.

В этом разделе предлагается рассмотрение еще одной безразмерной диаграммы идеализированного теплового двигателя Отто. Назовем эту диаграмму энергетической.

Энергетическая безразмерная диаграмма замкнутого термодинамического цикла теплового двигателя

В этом разделе предлагается рассмотрение еще одной безразмерной диаграммы идеализированного теплового двигателя Отто. Назовем эту диаграмму энергетической.

Энергетическая диаграмма отличается от индикаторных диаграмм тем, что на ней изображены не термодинамические процессы цикла двигателя, а теплота и механическая работа, которыми рабочее тело двигателя обменивается с окружающей средой. Именно такая диаграмма позволяет наиболее просто определять коэффициент полезного действия термодинамического цикла. Наряду с этим безразмерная энергетическая диаграмма теплового двигателя обладает всеми преимуществами безразмерных индикаторных диаграмм.

Особенностью безразмерной энергетической диаграммы является следующий простой математический прием – и подведенная, и отведенная теплота, и обе механические работы идеализированного цикла Отто отнесены к подведенной к рабочему телу теплоте.

В таком случае подведенная теплота в безразмерном виде равна $Q_{bp} = 1$, а отведенная от рабочего тела безразмерная теплота равна $Q_{bo} = \frac{Q_o}{Q_p}$.

В этих уравнениях: Q_p – подведенная в изохорном термодинамическом процессе к рабочему телу теплота; Q_{bp} – подведенная в изохорном термодинамическом процессе безразмерная теплота; Q_o – отведенная в изохорном процессе от рабочего тела теплота; Q_{bo} – отведенная в изохорном процессе от рабочего тела безразмерная теплота.

Коэффициент полезного действия любого термодинамического цикла определяется зависимостью:

$$\eta = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = 1 - \frac{Q_o}{Q_p}.$$

Для реализации поставленной цели выполним следующие действия:

1. По оси абсцисс энергетической диаграммы отложим степень сжатия рабочего тела двигателя. Такое решение предопределено тем, что при неизменных физических свойствах рабочего тела коэффициент полезного действия идеализированного цикла Отто зависит только лишь от степени сжатия рабочего тела [1].

2. По оси ординат отложим отношение теплоты отведенной и подведенной в цикле к рабочему телу к теплоте подведенной. Тогда безразмерная подведенная теплота к рабочему телу принимает значение равное единице (было установлено выше).

3. По оси ординат отложим также и отношение механических работ рабочего тела в процессах адиабатного сжатия и расширения к подведенной к рабочему телу теплоте.

Зависимости для расчетов теплоты и механической работы рабочего тела приведены в [5] и в таблице 2.

В цикле Отто все теплоты изохорных процессов – и подведенная и отведенная – и все механические работы адиабатных процессов описываются одним и тем же по внешнему виду уравнением. Объяснить это весьма просто.

При обмене между окружающей средой и рабочим телом теплотой в изохорном термодинамическом процессе, так же как и при обмене между рабочим телом и окружающей средой механической работой в адиабатном процессе, вся отведенная или подведенная к рабочему телу энергия изменяет только лишь внутреннюю энергию рабочего тела. Необходимые для выполнения расчетов уравнения приведены в таблице 2.

Одной из целей этой части работы является построение безразмерной энергетической диаграммы идеализированного двигателя Отто. Рассмотрим все приведенные в таблице 2 уравнения всех термодинамических процессов.

1. Изохорный безразмерный подвод теплоты. В этом процессе теплота подводится при неизменном объеме. Более того, в безразмерном виде величина подвода теплоты оговорена выше – эта величина равна $Q_{бес,p} = 1$. На энергетической диаграмме безразмерный подвод теплоты изображается вертикальным отрезком длиной равной одной единице.

2. Изохорный безразмерный отвод теплоты на энергетической диаграмме также отображается вертикальным отрезком, величина которого равна:

$$Q_{бес,o} = \frac{T_b - T_a}{T_d - T_c}.$$

Безразмерная механическая работа в адиабатном сжатии рабочего тела описана уравнением:

$$W_{бес,sz} = \frac{T_{sz} - T_a}{T_c - T_a}.$$

В этом уравнении T_{sz} – это изменяющаяся температура рабочего тела в зависимости от изменения степени сжатия по мере перемещения поршня в адиабатном процессе сжатия.

Таблица 2

Уравнения обмена теплотой и механической работой между окружающей средой
и рабочим телом в идеализированном цикле Отто [5]

Термодинамический процесс и его уравнение	Уравнения механической работы	Уравнения обмена теплотой между рабочим телом и окружающей средой
Адиабатное сжатие $P \cdot V^k = \text{const}$	$W_{sz} = \frac{MC_v}{k-1}(T - T_c);$ $W_{\text{без.sz}} = \frac{T_{sz} - T_c}{T_d - T_c}$	0
Адиабатное расширение $P \cdot V^k = \text{const}$	$W_r = \frac{MC_v}{k-1}(T_d - T_b);$ $W_{\text{без.r}} = \frac{T_r - T_b}{T_d - T_c}$	0
Изохорный подвод теплоты $V = \text{const}; \varepsilon = 1$	0	$Q_{cd} = MC_v \cdot (T_d - T_c)$ $Q = MC_v \cdot (T - T_c)$ $Q_{\text{без.p}} = \frac{T_p - T_c}{T_d - T_c}$ $0 \leq Q_{\text{без.p}} \leq 1$
Изохорный отвод теплоты $V = \text{const}; \varepsilon = 15$	0	$Q_{ba} = MC_v \cdot (T_b - T_a)$ $Q_{\text{без.o}} = \frac{T_b - T_a}{T_d - T_c}$ $T_a \leq T \leq T_b$

Примечания к таблице 2:

- 1) W_{sz} и $W_{\text{без.sz}}$ – механическая и безразмерная механическая работа, совершаемые над рабочим телом в процессе адиабатического сжатия;
- 2) W_r и $W_{\text{без.r}}$ – механическая и безразмерная механическая работа, совершаемые рабочим телом в процессе адиабатического расширения;
- 3) Q_{cd} и $Q_{\text{без.p}}$ – теплота и безразмерная теплота, подведенные к рабочему телу в изохорном процессе окисления топлива;
- 4) Q_{ba} и $Q_{\text{без.o}}$ – теплота и безразмерная теплота, уносимые в окружающую среду при истечении рабочего тела из двигателя.

Значение безразмерной температуры в процессе сжатия определяется зависимостью:

$$T_{sz} = \frac{T_c}{298} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Безразмерная механическая работа в адиабатном расширении рабочего тела описана уравнением:

$$W_{\text{без.r}} = \frac{T_r - T_b}{T_d - T_c}.$$

В этом уравнении T_r – текущее значение температуры рабочего тела в процессе адиабатного расширения.

По аналогии с процессом адиабатного сжатия значение безразмерной температуры определяется зависимостью:

$$T_{br} = \frac{T_d}{298} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Теперь, располагая уравнениями для расчета безразмерной теплоты, подводимой и отводимой от рабочего тела, а также зависимостями для расчета безразмерной механической работы, которой рабочее тело обменивается с окружающей средой, появилась возможность построения энергетической безразмерной диаграммы (рис. 2).

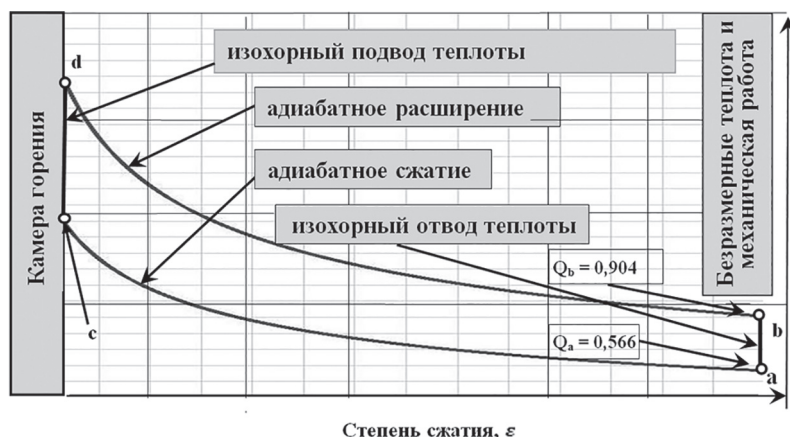


Рис. 2. Энергетическая безразмерная диаграмма идеализированного двигателя Отто

Предварительно заметим: при построении энергетической диаграммы было использовано еще одно упрощающее диаграмму действие. Разделив все полученные ранее безразмерные энергии на безразмерную энергию подвода теплоты к рабочему телу, получили значение безразмерной энергии подвода теплоты равное единице. В такой энергетической безразмерной диаграмме зависимость для определения коэффициента полезного действия идеализированного цикла Отто принимает совсем простой вид:

$$\eta = 1 - Q_{\text{без.о}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{без.о}}$ – безразмерная отведенная от рабочего тела теплота в изохорном процессе.

Для расчета безразмерной теплоты, которая отводится от рабочего тела в окружающую среду обратимся к таблице 2.

$$Q_{\text{без.о}} = \frac{T_b - T_a}{T_d - T_c}.$$

Используя уравнения термодинамических процессов адиабатного сжатия и расширения, определим температуры рабочего тела в начале сжатия и в конце процесса расширения:

$$T_a = \frac{T_c}{\varepsilon^{k-1}} \text{ и } T_b = \frac{T_d}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Подставим эти уравнения в уравнение 3, получим:

$$\eta = 1 - Q_{\text{без.о}} = 1 - \frac{T_b - T_a}{T_d - T_c} = 1 - \frac{\frac{T_d}{\varepsilon^{k-1}} - \frac{T_c}{\varepsilon^{k-1}}}{T_d - T_c} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Итак, при использовании энергетической безразмерной диаграммы было получено графоаналитическое решение для расчета коэффициента полезного действия идеализированного цикла теплового двигателя Отто. Это решение тождественно равно аналитическому решению 1.

Заключение

1. В работе показаны преимущества использования Теории подобия при исследованиях характеристик тепловых двигателей с помощью индикаторных диаграмм. Основное преимущество состоит в том, что одна диаграмма отражает характеристики бесконечно большого числа тождественно равных тепловых двигателей.

2. Графически, с использованием безразмерной индикаторной диаграммы идеализированного термодинамического цикла двигателя Отто показано, что эффективность теплового двигателя тем выше, чем больше степень сжатия рабочего тела. Термодинамически такой эффект обусловлен уменьшением отвода теплоты от рабочего тела в окружающую среду при его истечении из двигателя. Действительно, на безразмерной индикаторной диаграмме видно, что с увеличением степени сжатия увеличивается и степень расширения рабочего тела при его истечении из двигателя.

3. Разработана энергетическая безразмерная диаграмма идеализированного цикла теплового двигателя Отто. Показаны преимущества использования энергетических безразмерных диаграмм. Энергетическая диаграмма обладает всеми преимуществами присущими диаграммам, построенным с использованием Теории подобия.

4. Графоаналитически получено уравнение для расчета эффективности идеализированного цикла теплового двигателя Отто с использованием и безразмерной индикаторной диаграммы и энергетической безразмерной диаграммы цикла теплового двигателя. Оба решения тождественно равны аналитическому решению.

5. Графоаналитический вывод уравнения для расчета коэффициента полезного действия

идеализированного цикла двигателя Отто с использованием безразмерных диаграмм очень просты.

Литература

1. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: «Энергия», 1967. 224 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967. 600 с.
3. Прокопенко Н.И. Термодинамический расчет идеализированного цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2006. 144 с.
4. Бородин А.И. Лекции по технической термодинамике. Учебное пособие. Издательство Томского государственного архитектурно-строительного университета. Томск 2008. 160 с.
5. ГОСТ-Р 52517-2005. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1. Стандартные исходные условия, объявление мощности, расхода топлива и смазочного материала. Методы испытаний.
6. Построение функций онлайн. // Easima Lab. URL: <http://www.yotx.ru> (дата обращения: 1.10.2019)
7. Цикл Отто // Википедия. URL: http://ru.wikipedia.nom.si/wiki/Цикл_Отто (дата обращения: 1.10.2019)

References

1. Keys V.M., London A.L. *Kompaktnyye teploobmenniki* [Compact heat exchangers]. Moscow: Energiya Publ., 1967. 224 p.
2. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat transfer]. Moscow: Vysshaya shkola Publ. 1967. 600 p.
3. Prokopenko N.I. *Termodinamicheskiy raschet idealizirovannogo tsikla porshnevoogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Thermodynamic calculation of the idealized cycle of a piston internal combustion engine]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy Publ. 2006. 144 p.
4. Borodin A.I. *Lektsii po tekhnicheskoy termodinamike. Uchebnoye posobiye* [Lectures on technical thermodynamics. Tutorial]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta Publ. 2008. 160 p.
5. *GOST-R 52517-2005. Reciprocating internal combustion engines. Characteristics. Part 1. Standard reference conditions, declaration of power, fuel consumption and lubricant. Test methods.*
6. Building functions online. // Easima Lab. URL: <http://www.yotx.ru> (accessed: 1.10.2019)
7. Otto Cycle // Vikipediya. URL: http://ru.wikipedia.nom.si/wiki/Tsikl_Otto (accessed: 1.10.2019).

THERMODYNAMIC SIMILAR INDICATOR DIAGRAMS OF THE HEAT ENGINES ENERGY NON-DIMENSIONAL DIAGRAM OF THE HEAT ENGINE CLOSED CYCLE

PhD in Engineering **F.E. Kalnitskiy, D.I. Morozov, M.G. Tatarov**, PhD in Engineering **A.I. Fedulov**
Moscow Polytechnic University
kostukov123@yandex.ru

To provide an analysis of the thermodynamic processes occurring in a heat engine and its efficiency the indicator diagrams are used. The diagrams are constructed in the dimensional values of the parameters of the working fluid: volume, entropy, pressure, temperature, and other parameters. Exceptions include, for example, experimental studies and thermodynamic calculations performed, when designing a Laval nozzle for jet engines. These studies are based on the Similarity Theory. The paper shows graphoanalytical calculation of the efficiency of the idealized cycle of a heat engine in dimensionless working body parameters. Research methods using dimensionless parameters – similarity criteria are a characteristic feature of the Similarity Theory. In addition to the dimensionless indicator diagram, an energy dimensionless diagram of a circular closed loop of a heat engine was developed and described. The energy diagram depicts the thermodynamic processes of the exchange of heat and mechanical work between the working fluid and the environment in the dimensionless coordinates of heat and mechanical work. It is shown in the paper that the use of an energy dimensionless diagram is the simplest and most obvious graphoanalytical method for determining the efficiency of a heat engine. With regard to the analysis of the operation of a heat engine, the importance of using the Similarity Theory is determined by the fact that the only analytical, graphic or experimental study of a heat-specific engine with the least difficulties can be extended to the study of an infinite number of thermodynamically similar engines. For example, in the proposed work, the dimensionless calculation of the idealized Otto engine cycle is performed.

Keywords: heat engine, heat engine thermodynamic cycle, the indicator diagram thermodynamic diagram energy cycle, similarity Theory efficiency (efficiency), mechanical work, thermodynamic process, thermodynamically similar engines, similarity criteria.